

磁力研磨工艺提高叶片表面质量的试验研究

夏楠¹, 马小刚¹, 吴传宗¹, 张亮², 杨诗瑞², 陈燕¹

(1. 辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051;

2. 北京动力机械研究所, 北京 100074)

摘要: **目的** 提高航空发动机涡轮叶片的服役年限。**方法** 应用磁力研磨工艺提高涡轮叶片表面质量, 包括降低叶片表面粗糙度、去除飞秒激光制孔过程中产生的棱边毛刺以及降低叶片表面残余应力, 建立神经网络模型确定最佳工艺参数, 在最佳工艺参数下对叶片进行研磨加工。使用 JB-8E 触针式表面粗糙度测量仪、超景深显微镜和 X'Pert Powder 残余应力测试分析系统, 分别对叶片表面粗糙度、孔口形貌以及叶片表面残余应力进行分析。**结果** 叶片在最佳工艺参数下完成研磨加工, 叶片表面粗糙度从 $3.08\text{ }\mu\text{m}$ 下降到 $0.19\text{ }\mu\text{m}$, 叶片气膜孔棱边毛刺基本去除, 且存在倒圆迹象, 研磨后叶片晶格更加致密, 受力状态从残余拉应力 (324.7 MPa) 转变为残余压应力 (132.8 MPa)。**结论** 应用磁力研磨工艺可以有效降低叶片表面粗糙度, 去除叶片气膜孔的棱边毛刺, 对气膜孔的棱边进行倒圆加工, 提高飞秒激光制气膜孔的表面质量, 同时还可以将叶片的残余拉应力转化为残余压应力, 使得叶片晶格排布更加紧密, 在提高叶片强度和耐磨性的同时不会引入新的缺陷, 增加叶片的服役寿命。

关键词: 涡轮叶片; 磁力研磨; 表面粗糙度; 残余应力; 神经网络; 气膜孔质量; 服役寿命

中图分类号: TG356.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)02-0067-11

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.02.007

Experimental Investigation of Magnetic Finishing for Improving Blade Surface Quality

XIA Nan¹, MA Xiao-gang¹, WU Chuan-zong¹, ZHANG Liang², YANG Shi-rui², CHEN Yan¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Liaoning Anshan 114051, China; 2. Beijing Power Machinery Institute, Beijing 100074, China)

ABSTRACT: To improve the service life of turbine blade, in this paper, The magnetic grinding was applied to improve the surface quality of turbine blade, including reducing the surface roughness of the blade, removing the edge burr generated in the process of femtosecond laser hole making, and reducing the residual stress on the blade surface. A neural network model was established to determine the best process parameters, and the blade was ground under the best process parameters. Using JB - 8 e

收稿日期: 2022-11-09; 修订日期: 2023-02-01

Received: 2022-11-09; Revised: 2023-02-01

基金项目: 国家自然科学基金 (51775258); 辽宁省自然科学基金重点项目 (20170540458); 精密与特种加工教育部重点实验室基金 (B201703)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51775258); Natural Science Foundation Plan Key Projects of Liaoning Province (20170540458); Key Laboratory Fund of Ministry of Precision and Special Processing Education (B2017030)

作者简介: 夏楠 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为精密加工与特种加工。

Biography: XIA Nan (1999-), Male, Postgraduate, Research focus: precision and special processing.

通讯作者: 马小刚 (1988—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为复杂工件表面精密加工与特种加工。

Corresponding author: MA Xiao-gang (1988-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: complex workpiece surface special processing.

引文格式: 夏楠, 马小刚, 吴传宗, 等. 磁力研磨工艺提高叶片表面质量的试验研究[J]. 表面技术, 2023, 52(2): 67-77.

XIA Nan, MA Xiao-gang, WU Chuan-zong, et al. Experimental Investigation of Magnetic Finishing for Improving Blade Surface Quality[J]. Surface Technology, 2023, 52(2): 67-77.

contact pin type surface roughness measuring instrument, the depth of field microscope and X 'Pert Powder respectively on blade surface residual stress test analysis system, the blade film hole roughness and orifice morphology and blade surface residual stress were analyzed. The blade surface roughness decreased from $3.08\text{ }\mu\text{m}$ to $0.19\text{ }\mu\text{m}$, the edge burrs of the blade film holes were basically removed, and there were signs of inverted circle. After grinding, the blade lattice became more compact, and the residual tensile stress changed from 324.7 MPa to 132.8 MPa . The application of magnetic grinding can effectively reduce the surface roughness of the blade, remove the edge burr of the blade film hole. The edge of the blade film hole can be processed in an inverted circle, and the surface quality of the femtosecond laser blade film hole can be improved. At the same time, the residual tensile stress of the blade can be converted into residual compressive stress, making the lattice arrangement of the blade closer. It can improve the strength and wear resistance of blade without introducing new defects and increase the service life of blade.

KEY WORDS: turbine blade; magnetic grinding; surface roughness; residual stress; neural network; film hole quality; service life

航空涡轮发动机中的涡轮叶片是航空领域中极为重要的零件,其形状如图 1 所示,由于涡轮叶片在工作时一直处于高温和高压的恶劣环境,为保证叶片的服役寿命,除了使用高温合金材料制造叶片^[1-2]和采用计算流体力学设计叶片外形^[3-6]之外,对叶片的表面质量也有着严格的要求,叶片表面质量一般包括叶片表面粗糙度、表面残余应力以及叶片气膜孔的质量。叶片表面粗糙度会影响涡轮叶片工作时的传热^[7]以及涡轮工作性能^[8-9],叶片表面残余应力会影响叶片的疲劳失效^[10-11],叶片气膜孔的作用是冷却叶片的表面,防止叶片因高温而发生失效,其冷却方式是从叶片气膜孔中喷出冷却空气,在叶片表面形成一层冷空气膜来隔绝高温^[12-15]。所以叶片气膜孔的质量直接关系到叶片是否能在高温高压的恶劣环境中稳定长久的工作^[16-17]。因此如何提升叶片表面质量尤其是叶片气膜孔的质量是航天领域内的重要问题^[18]。目前制造叶片气膜孔的方式主要有两种,第一种为电火花及电液束气膜孔加工工艺^[19-22],第二种为飞秒激光气膜孔加工工艺^[23-25]。由于电火花及电液束气膜孔加工存在设备自动化程度低、加工异形孔工艺复杂等缺陷,而飞秒激光加工具有加工效率高、加工精度高的优点

而被广泛用于加工叶片气膜孔,但是飞秒激光加工气膜孔时依然难以避免出现如图 2 所示的孔棱边毛刺、熔融层积瘤以及微裂纹等表面缺陷。若不经处理,叶片在工作过程中会出现毛刺脱落堵塞气膜孔从而导致叶片使用寿命大幅缩减,为了制造高质量的叶片,需要对成型的叶片进行后处理加工。目前,传统的研磨工艺难以对微小气膜孔棱边毛刺进行去除且无法有效地对曲面进行光整加工,而应用化学方式对缺陷进行去除容易产生污染和化学成分残留,而磁针磁力

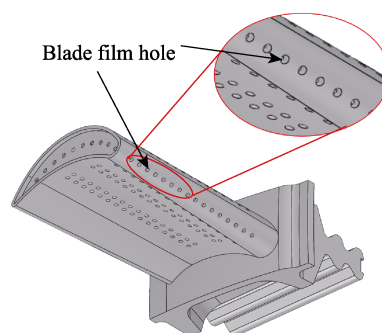


图 1 叶片模型

Fig.1 Blade model diagram

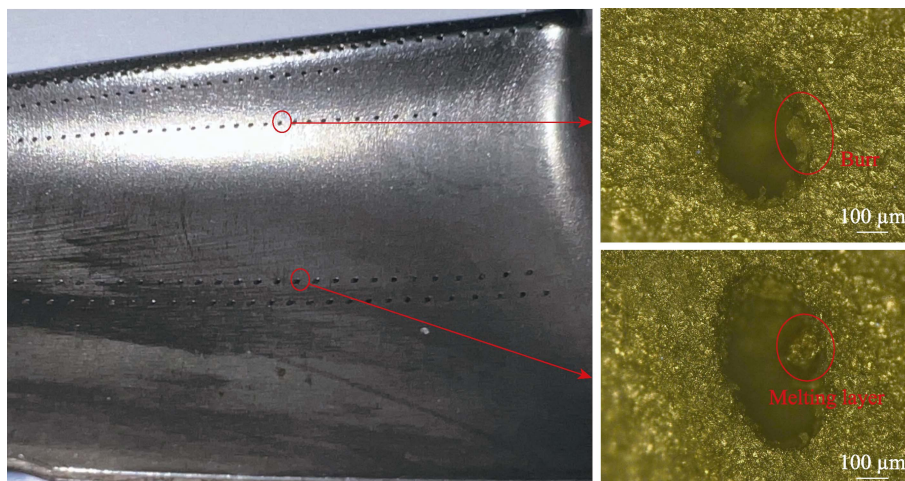


图 2 叶片气膜孔加工缺陷

Fig.2 Machining defect of blade air film hole

研磨作为特种加工方式,属于柔性加工方式,具有去除量小、加工质量高等优点^[26],在国内应用广泛。杨欢等^[27]使用磁针研磨法去除蒙皮微孔边缘的毛刺,成功去除了蒙皮微孔边缘毛刺和积瘤,同时表面粗糙度降低至 $1.700\ 2\ \mu\text{m}$,其不足之处在于毛刺去除率不能达到 100%。徐会等^[28]和陈燕等^[29]分别使用磁力研磨法去除燃油喷嘴和涡轮轴内的积碳,经研磨后,残余积碳均小于技术要求的规定值,满足使用要求。磁针磁力研磨对复杂表面上的微孔可以起到较好的加工效果,针对提高叶片表面质量的问题并结合磁针磁力研磨的特点,本文提出应用磁针磁力研磨工艺来提高叶片的表面质量。

1 磁力研磨技术原理

将工件、磁针研磨介质以及研磨液放置于容器中,利用磁力线可以穿透物体及旋转磁场下磁力线方向不断变化的特性带动大量磁针研磨介质旋转,由于磁针在运动过程中受到重力、磁极吸引力、磁针间相互作用力、磁针与容器相互作用力、浮力的作用,因此其运动轨迹复杂无序、没有规律,使得磁针的加工区域可以覆盖整个工件表面。磁针在运动过程中会与工件加工区域产生碰撞、刮擦、滚压等相对运动,可以通过大量磁针不断的无序冲击以达到去除工件表面缺陷的目的^[30],其基本原理图如图 3 所示。

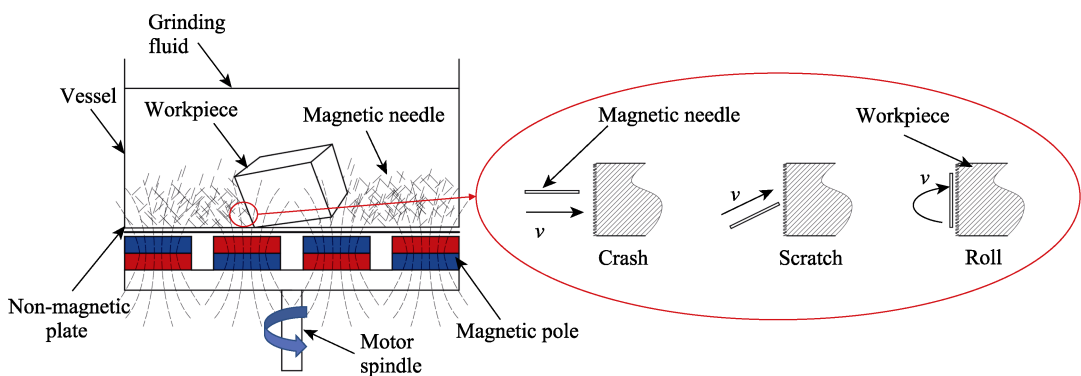


图 3 磁力研磨原理图
Fig.3 Principle diagram of magnetic grinding

2 试验

2.1 过程

本文研究使用的涡轮叶片试件,其长度方向最长为 90 mm。宽度方向最长为 40 mm、高度方向最长为 20 mm,由于磁针受的磁场力与磁针本身的质量以及磁场强度有关,因此本试验选择磁场旋转速度 n 、加工时间 t 、磁针直径 d 和磁针长度 l 为试验参数,对涡轮叶片加工后表面粗糙度 Ra 的影响关系进行探讨。图 4 为试验所用装置,将待加工工件放置于容器中,选择合适的磁针直径 d 和长度 l 后,将质量为 2 kg 的磁针放入桶中,选择清水为研磨液,向桶中加入清水直至没过磁针和工件,设置磁极盘的转速 n 和研磨时间 t ,开始加工。

2.2 神经网络数据处理

BP 神经网络是一种多层前馈的神经网络,该阶层型网络是由输入层、中间隐含层和输出层组成,信号前向传递、误差反向传播是其主要特征。输入信号从输入层经隐含层最后到达输出层,若输出层的输出效果不是所期望的,便进行逆向反转,调整自身网络数值让 BP 神经网络达到所需要的预测效果,其原理如图 5 所示。

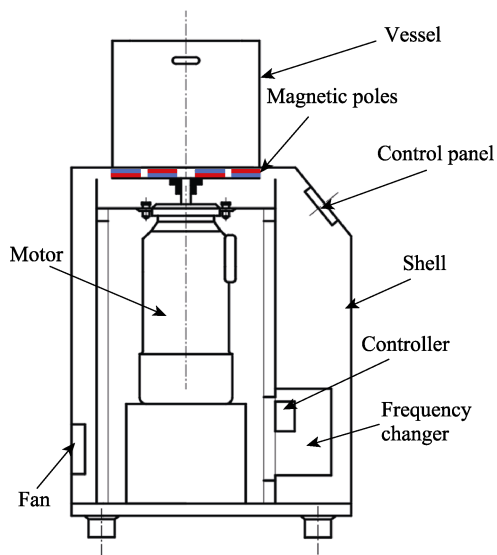


图 4 磁力研磨试验装置示意图
Fig.4 Magnetic grinding test device diagram

为了探究各个工艺参数与叶片表面加工质量的关系,首先需要建立网络模型,其主要工作有数据的采集和处理、设计网络模型的层数、隐含层的设计等,通过合理地设计网络模型的相关参数,使网络模型在预测值与真实值更接近。由于 3 层的 BP 神经网络已经足够获得任何 m 维到 n 维的映射,本文选择 3 层

的 BP 神经网络。为了获得较高的收敛精度，经过多次神经网络构造对比来选择隐含层的节点数，其结果如表 1 所示，从表中可得，当隐含层节点数为 7 时，精度高且迭代快，因此本试验选择构造的 BP 神经网络为 3 层且隐含层的节点数为 7 个。

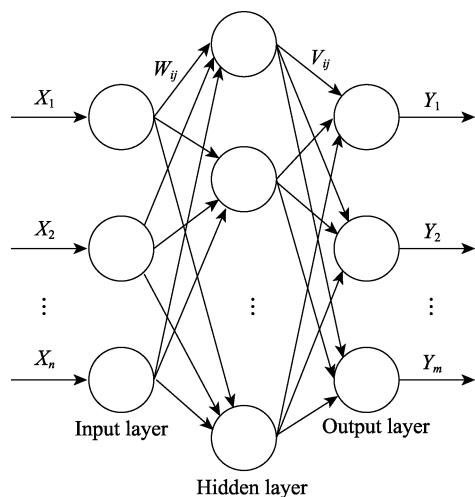


图 5 神经网络结构

Fig.5 Neural network structure diagram

表 1 不同隐含层节点数的训练结果

Tab.1 Range of parameter

Number of hidden layer nodes	Number of iterations	Convergence accuracy
3	4	2.5×10^{-3}
4	3	3.83×10^{-3}
5	5	3.38×10^{-2}
6	7	4.67×10^{-3}
7	1	4.02×10^{-4}
8	2	7.06×10^{-3}
9	5	1.55×10^{-3}
10	4	8.06×10^{-4}
11	4	3.58×10^{-3}
12	2	6.83×10^{-3}

采用控制变量法，以叶片表面粗糙度为研究对象，所用试件原始粗糙度 Ra 均在 $2.90 \mu\text{m}$ 到 $3.10 \mu\text{m}$ 之间，依次探究磁针型号、磁极转速、研磨时间对工件表面质量的影响。本试验以涡轮叶片表面粗糙度值为最终评价标准，将旋转磁场转速 n 、研磨时间 t 、磁针直径 d 和磁针长度 l 作为设计的变量，其工艺参数取值范围如表 2 所示，在已经创建好的 BP 神经网络寻找最优解，模型建立如下：

设计变量 $X=[n, t, d, l]$ ，即磁极转速 n 、加工时间 t 、磁针直径 d 以及磁针长度 l 这 4 个变量。

目标值 Y_{\min} ，即表面粗糙度最小值。

约束条件： $400 \leq n \leq 1\,200$ ， $1.0 \leq t \leq 6.0$ ， $0.3 \leq d \leq 1.0$ ， $3.0 \leq l \leq 8.0$ 。

表 2 工艺参数取值范围

Tab.2 Range of parameter

Magnetic rotation speed $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	Time t/h	Diameter of needle d/mm	Length of needle l/mm
400-1 200	1.0-6.0	0.3-1.0	3.0-8.0

由于 BP 神经网络需要大量的数据作为支撑才能够保证预测结果的可靠性，因此在工艺参数的取值范围内，采用控制变量法进行了大量试验。由于输入变量为 4 种，而输出变量为 1 种，训练所需样本较少，为了减少神经网络计算所需的时间，共选取 20 组样本试验及结果，每组样本的试验重复 3 次并取加工后表面粗糙度的平均值为最终结果，具体情况如表 3 所示。

表 3 样本试验及结果

Tab.3 Sample test and results

Sample	Magnetic rotation speed $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	Time t/h	Diameter of needle d/mm	Length of needle l/mm	Surface roughness $Ra/\mu\text{m}$
1	400	4.5	0.5	5	0.29
2	400	4.5	0.3	5	0.30
3	400	4.5	1.0	5	0.60
4	1 200	4.5	0.5	5	0.35
5	1 200	4.5	0.5	3	0.32
6	1 200	4.5	0.5	7	0.45
7	800	4.5	0.5	5	0.21
8	800	4.5	0.3	5	0.28
9	800	4.5	1.0	5	0.80
10	800	4.5	1.0	8	1.12
11	800	4.5	0.3	8	0.60
12	800	4.5	0.5	8	0.80
13	800	4.5	0.5	3	0.28
14	800	4.5	0.5	7	0.30
15	800	1.0	0.5	5	0.63
16	800	2.0	0.5	5	0.56
17	800	3.0	0.5	5	0.51
18	800	4.0	0.5	5	0.38
19	800	5.0	0.5	5	0.32
20	800	6.0	0.5	5	0.18

为了保证神经网络的拟合效果，分别对磁极转速、研磨时间、磁针长度以及磁针直径与叶片表面粗糙度进行回归相关分析，研究 4 个变量对表面粗糙度的影响程度，其分析结果如图 6 所示。

回归值 R 作为神经网络拟合效果的判别依据，其值大小越接近 1，则拟合效果越好，也代表此输入变量与输出变量之间的相关性越高，影响程度越大。从图 6 中可以看出，磁极转速、研磨时间、磁针长度以及磁针直径与叶片表面粗糙度之间有较为明显的回

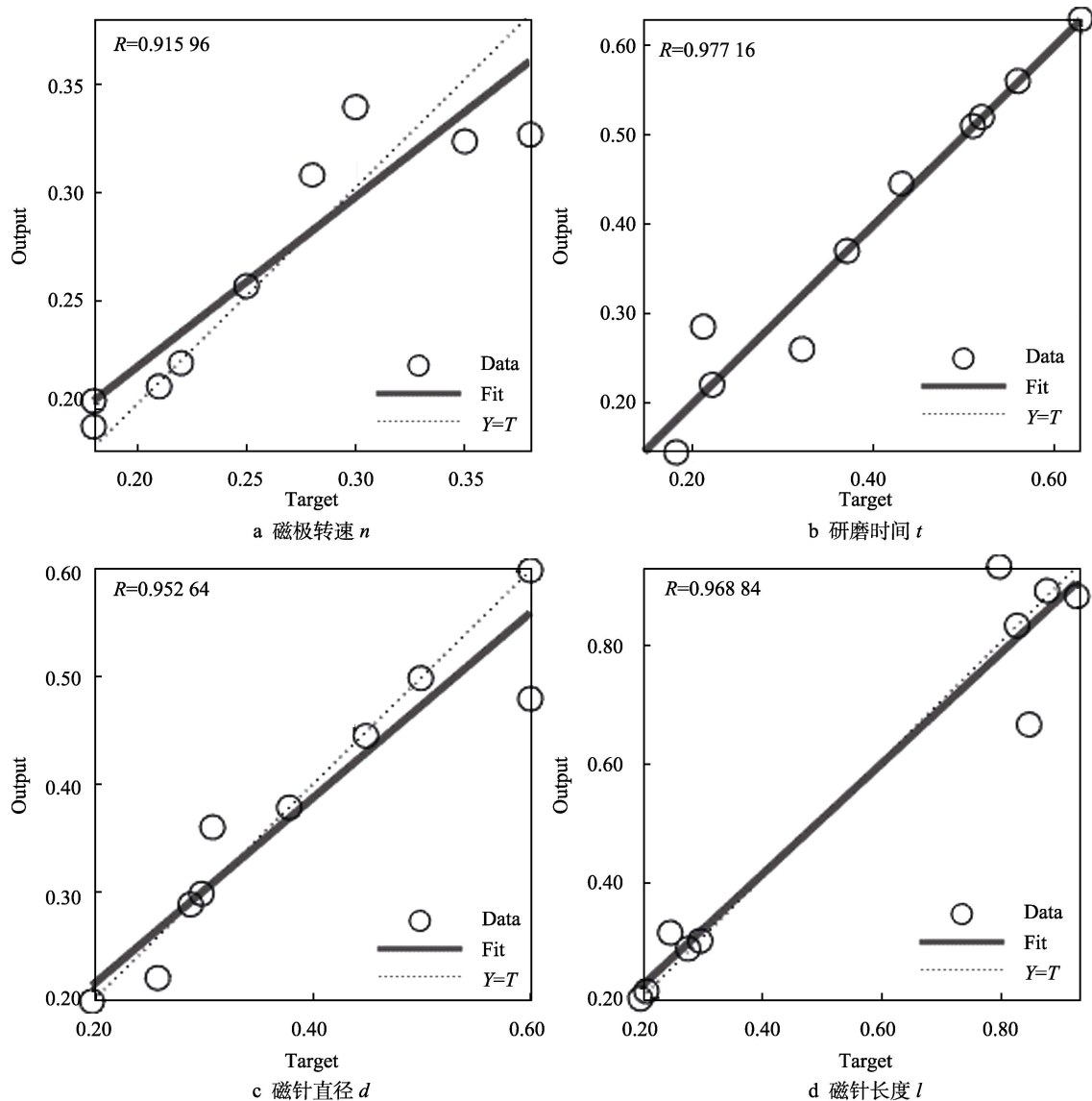


图 6 各个输入变量与表面粗糙度的相关性分析
Fig.6 Correlation analysis diagram of each input variable and surface roughness: a) magnetic rotation speed; b) time; c) diameter of needle; d) length of needle

归关系,其中研磨时间 t 与表面粗糙度的相关性最大,其回归值为 $R=0.977\ 16$;磁针长度 l 、磁针直径 d 与表面粗糙度的相关性次之,回归值 R 分别为 $0.968\ 84$ 和 $0.952\ 64$;磁极转速 n 与表面粗糙度相关性最低,但其回归值 R 为 $0.915\ 96$,距离 1 接近,可以认为磁极转速与表面粗糙度仍有较强的相关性。综上分析,磁极转速、研磨时间、磁针长度以及磁针直径与叶片表面粗糙度具有明显的回归关系。

使用表中数据对 BP 神经网络进行训练,BP 神经网络训练的结果可以反映磁极转速、研磨时间、磁针直径、磁针长度与叶片表面粗糙度之间的关系。从表 3 中随机选取 15 组数据作为训练组,剩余 5 组数据作为预测组。经过反复训练之后,可以得到比较理想的输出模型,通过 300 次迭代的反复训练,数据拟合结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出,预测值和期望输出值之间的误差比较小,误差控制在 5%以内,

且轨迹形状接近,预测结果较为理想,因此可以确定此 BP 神经网络模型的建立具有良好的准确性且预测结果与实际接近。

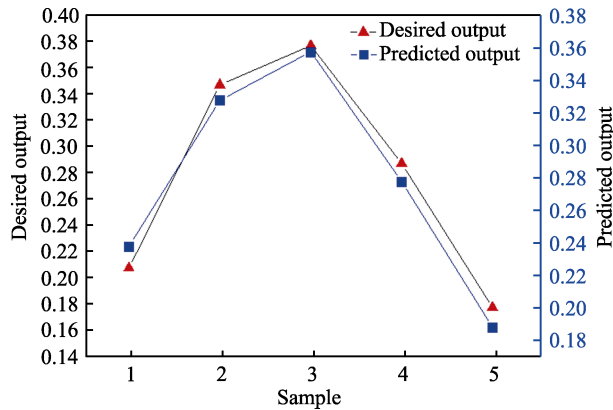


图 7 随机抽取样本值与预测结果值对比
Fig.7 Random sample value comparison with predicted value

经过 300 次的迭代, 最终得到最优的表面粗糙度值 $Y_{\min}=0.18$, 最佳工艺参数为 $X=[450.66, 4.78, 0.64, 3.74]$ 。由于磁极转速、研磨时间、磁针直径、磁针长度为整数, 对其最优参数组合进行规整, 可以得出最优工艺参数为 $X=[450, 5.0, 0.6, 4.0]$ 。利用遗传算法优化得到的 BP 神经网络最优参数组合对涡轮叶片试样进行研磨加工, 用试验得出的结果与神经网络预测的进行对比, 验证其准确性, 表 4 为最终确定的试验参数。采用神经网络模型优化后的参数进行试验加工并对结果进行分析。

表 4 试验参数
Tab.4 test parameters

Parameters	Experimental conditions
Magnetic rotation speed $n/(r \cdot \min^{-1})$	450
Time t/h	5.0
Diameter of needle d/mm	0.6
Length of needle l/mm	4.0

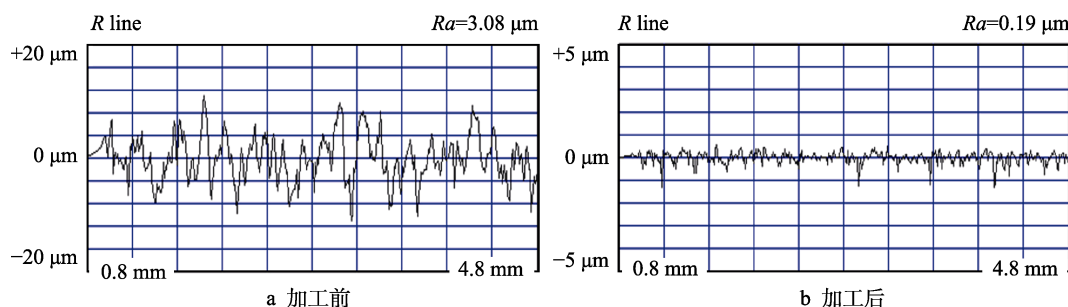


图 8 加工前后叶片表面粗糙度

Fig.8 Surface roughness of blade before and after machining: a) before processing; b) after processing

3.2 表面形貌

使用超景深显微镜对同一个孔研磨前后的形貌进行观察, 其表面形貌如图 9 所示。从图中可以看出, 经过工艺参数优化后的磁力研磨加工, 飞秒激光加工微孔过程中出现的棱边处毛刺得到去除, 气膜孔尖锐棱边出现倒圆迹象, 且飞秒激光制气膜孔时产生的轮廓缺陷得到一定的修复。

为了确定经过磁力研磨加工后的叶片气膜孔是否有倒圆的迹象, 使用线切割机床将叶片气膜孔切开, 由于微孔较小且线切割丝本身具有一定的厚度, 为防止过切, 切割时不正对微孔中心, 气膜孔位置如图 10 所示。使用超景深显微镜观察孔壁剖面, 气膜孔形貌与剖面图如图 11 所示, 可以确定经过研磨后的微孔棱边存在倒圆, 叶片气膜孔的棱边在倒圆后原本尖锐棱边应力集中点消失, 可以预防因应力集中导致的开裂。

3.3 金相组织及残余应力

为了了解磁针研磨对叶片的金相组织以及残余

3 结果及分析

3.1 表面粗糙度

使用 JB-8E 触针式表面粗糙度测量仪对研磨前后叶片表面进行测量, 多次测量取粗糙度值的平均值作为工件研磨后的粗糙度值, 这样避免了偶然性, 使试验数据更具有真实性、可靠性。经 JB-8E 触针式表面粗糙度测量仪检测, 其结果如图 8 所示, 经过参数优化的磁力研磨加工后, 叶片的表面粗糙度 Ra 从 $3.08 \mu m$ 降低到 $0.19 \mu m$, 结果与神经网络预测模型的结果相差无几, 可以证明神经网络模型的准确性。

涡轮叶片在工作时, 叶片会高速旋转并与空气产生摩擦。如果叶片的表面粗糙度较大, 那么叶片表面粗糙度颗粒会与空气摩擦进一步扩大原有的表面缺陷, 造成使用寿命降低。而经过磁力研磨后叶片表面粗糙度明显降低, 表面质量得到明显提升, 有效保证叶片的服役寿命。

应力是否有所影响, 使用线切割将研磨前后的叶片表面沿着纵向切开, 得到叶片的切面。采用导电型冷镶嵌树脂来镶嵌叶片的切面, 如图 12 所示。对镶嵌好的工件表面进行研磨抛光, 最后使用腐蚀液腐蚀工件表面 6 s。使用超景深显微镜观察图 12 中红圈位置的叶片切面形貌, 如图 13 所示, 可以看出研磨前后金相组织的方向并未发生明显变化。

为验证其准确性, 对图 12 中试样的红圈位置表面分别拍摄电镜图, 其结果如图 14 所示。从电镜图中可以看出, 研磨前后晶格的生长方向没有发生改变, 因此磁针磁力研磨加工工艺不会改变工件内部的晶格结构。除此之外, 相较于加工前, 经过磁针磁力研磨加工后的叶片切面条纹更加密集, 纹理更加紧实, 在有效保留工件内部原有晶格的前提下, 研磨前后叶片切面的纹理间距明显减小, 叶片残余应力有释放或转化为压应力的趋势。

航空发动机涡轮叶片长期在高温高压的环境下工作, 残余应力会使其在工作过程中产生裂纹, 加快叶片损坏速率, 减少叶片寿命。为了探究磁针磁力研磨工艺是否可以释放叶片残余拉应力或将残余拉应

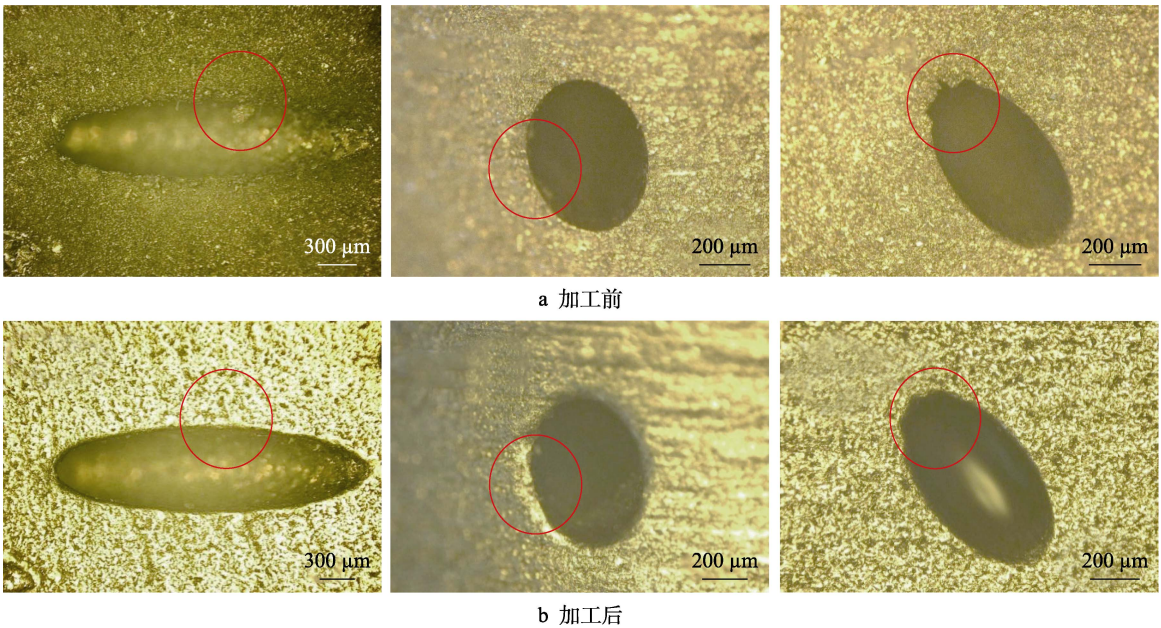


图 9 加工前后叶片气膜孔表面形貌
Fig.9 Surface topography of blade before and after machining: a) before processing; b) after processing

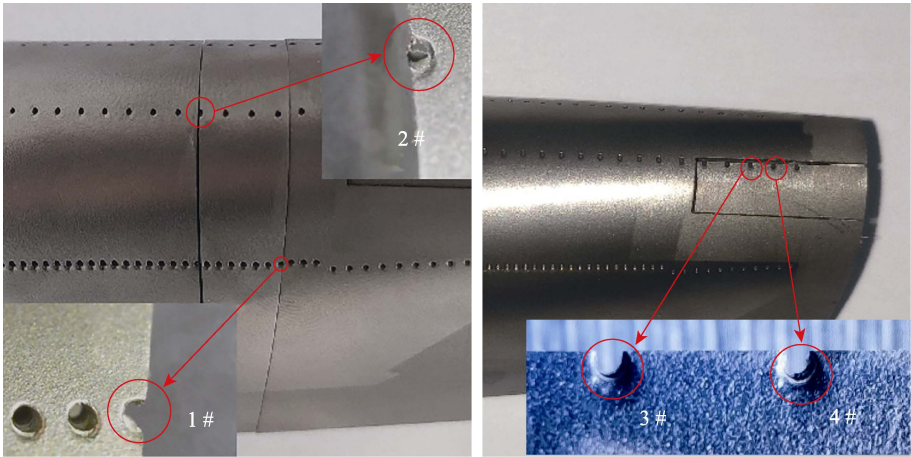


图 10 叶片切割实物
Fig.10 Drawing of blade cutting

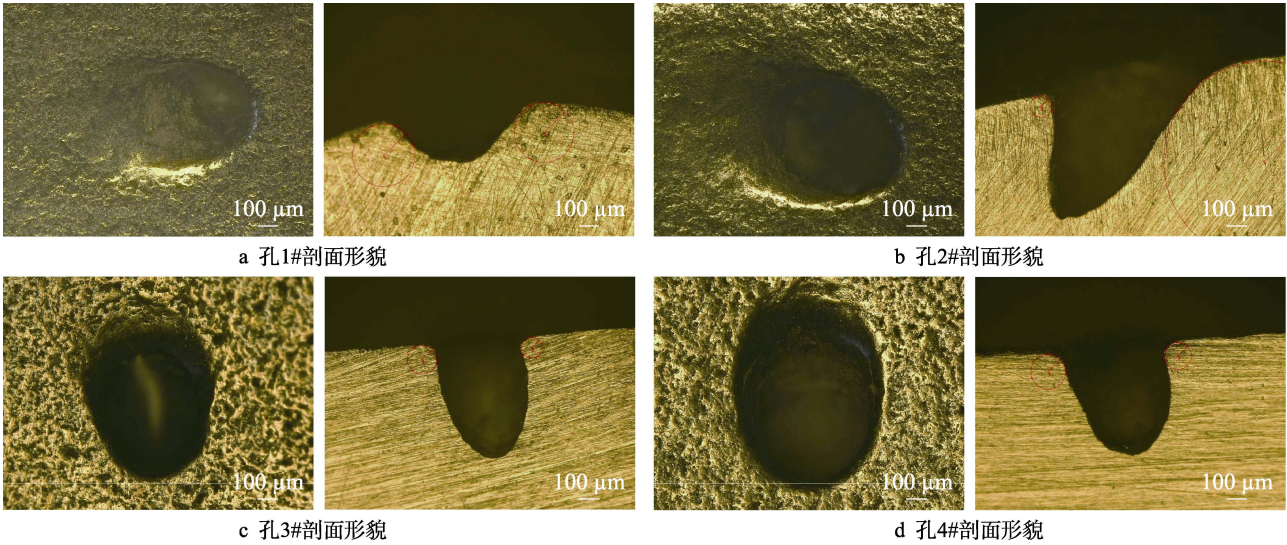


图 11 叶片孔剖面形貌
Fig.11 Surface topography of blade hole profile: a) micropore 1#; b) micropore 2#; c) micropore 3#; d) micropore 4#

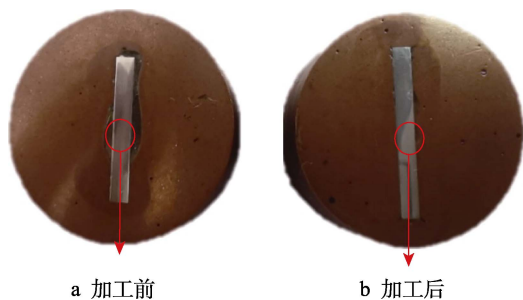


图 12 镶嵌工件实物
Fig.12 Picture of inlaid workpiece: a) before processing; b) after processing

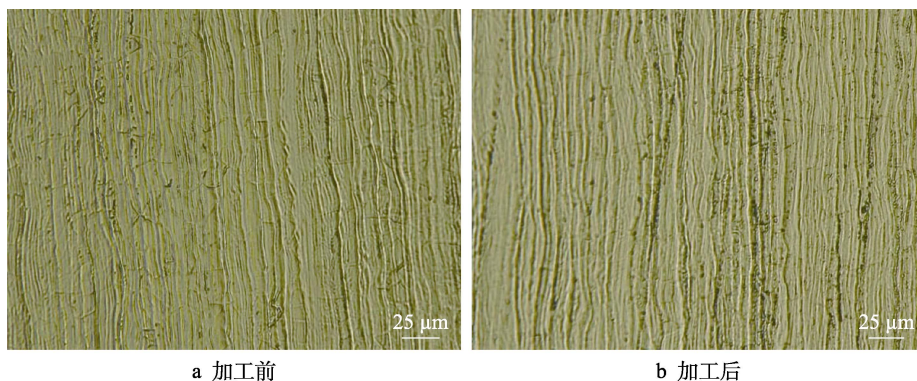


图 13 研磨前后叶片切面表面形貌
Fig.13 Surface topography of blade section before and after machining: a) before processing; b) after processing

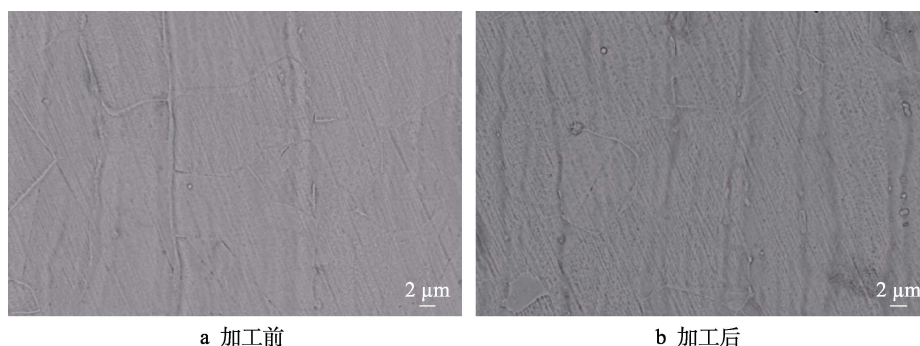


图 14 研磨前后金相组织
Fig.14 Metallographic structure diagram before and after machining: a) before processing; b) after processing

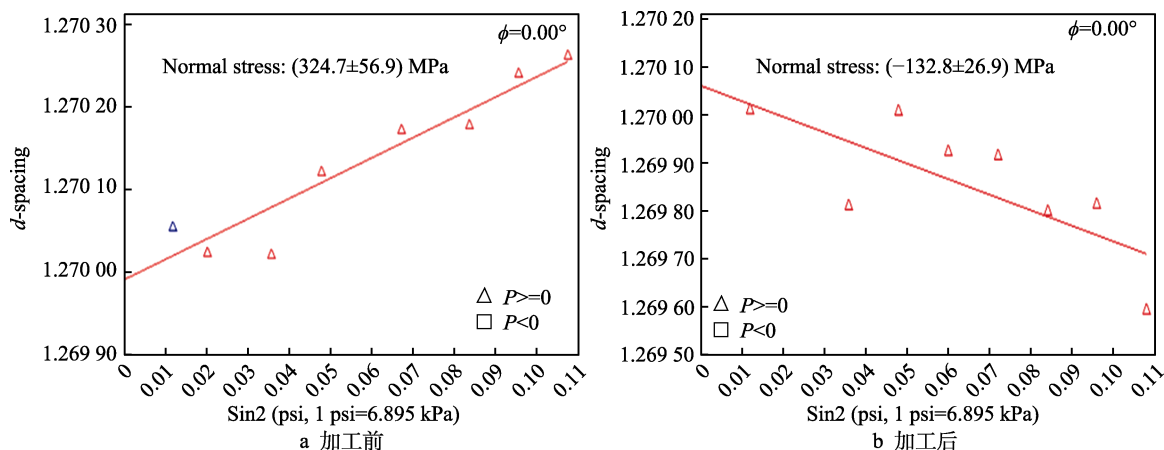


图 15 加工前后残余应力变化曲线
Fig.15 Residual stress curve before and after machining: a) before processing; b) after processing

力转化为压应力,采用 X 射线衍射仪对表面残余应力进行检测。将涡轮叶片切片后制成试样,再将涡轮叶片试样表面用丙酮清洗干净,测量结果如图 15 所示。

从图 15 中可以看出,叶片表面残余应力由原始的拉应力 324.7 MPa 转变为压应力 132.8 MPa,残余应力得到了有效改善,可以提高叶片抗疲劳强度,提高其服役寿命。

3.4 成分分析

涡轮叶片的主要材料为 DD6 单晶高温合金,磁力研磨加工叶片的过程中,磁针会高频无序地冲击叶

片表面。为验证在加工过程中叶片表面是否会出现铁素体残留, 使用 EDS 元素分析技术对研磨前后叶片表面的组织成分进行分析, 试件如图 16 所示, 采用 EDS 对试件成分进行分析, 其结果对比如图 17 所示。

从图 18 的检测结果可以看出, 研磨前后涡轮叶片材料各组成成分保持一个比较平衡的状态, 铁基体元素没有增加。磁针磁力研磨加工过程依靠磁针持续无序性撞击涡轮叶片表面, 并不会残留铁基体在叶片表面, 而磁针磁力研磨工艺属于纯物理加工, 不会产生新的污染以及引入新的缺陷。

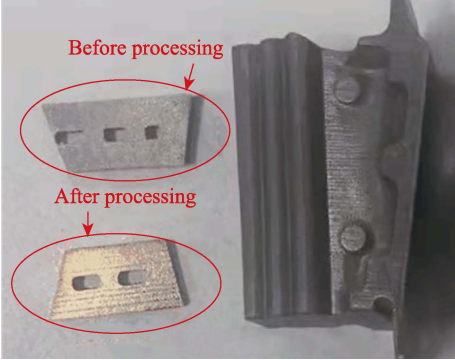


图 16 EDS 分析试件实物图
Fig.16 EDS analysis of the specimen

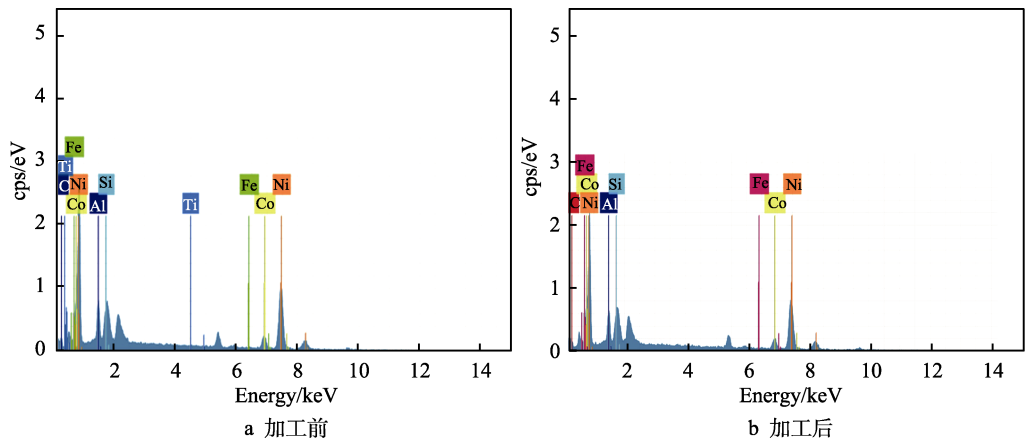


图 17 EDS 分析图
Fig.17 EDX analysis before and after machining a) before processing; b) after processing

El.	Atom number	Net value	Mass/%	Normalized mass/%	Atom/%	Abs.error (3 sigma)/%
C	6	285	2.15	4.00	15.62	2.24
Al	13	1 671	1.83	3.40	5.92	0.39
Si	14	2 358	2.34	4.36	7.29	0.43
Fe	26	12	0.03	0.06	0.05	0.03
Co	27	1 327	6.16	11.48	9.14	0.88
Ni	28	7 162	37.92	70.61	56.48	3.90

a 加工前

El.	Atom number	Net value	Mass/%	Normalized mass/%	Atom/%	Abs.error (3 sigma)/%
C	6	182	1.50	3.44	13.50	1.86
Al	13	1 389	1.82	4.18	7.29	0.40
Si	14	2 139	2.55	5.86	9.83	0.46
Fe	26	7	0.02	0.05	0.04	0.02
Co	27	965	4.18	9.60	7.67	0.67
Ni	28	5 985	33.48	76.87	61.67	3.51

b 加工后

图 18 EDS 元素含量图
Fig.18 Element content in EDS before and after machining a) before processing; b) after processing

4 结论

1) 应用磁力研磨来加工涡轮叶片可以有效去除飞秒激光加工叶片气膜孔过程中出现的棱边毛刺等表面缺陷。

2) 采用神经网络算法优化了磁力研磨的工艺参数, 经过优化后的磁力研磨加工后, 叶片表面粗糙度从原始的 $3.08\text{ }\mu\text{m}$ 降低到 $0.19\text{ }\mu\text{m}$, 有效提升了叶片的表面质量, 叶片的气膜孔尖锐棱边有倒圆的趋势, 减少了叶片气膜孔尖锐棱边处的应力集中。

3) 加工后的叶片金相组织相较于加工前在晶体方向以及成分上没有发生改变, 同时晶格纹理致密

程度有所提升, 有效释放了叶片的残余拉应力, 经过磁力研磨后叶片的残余应力由原始拉应力 324.7 MPa 转变为压应力 132.8 MPa , 避免了因残余拉应力导致叶片在工作中产生内裂纹而发生失效, 有效提高了叶片的疲劳强度和服役年限。

4) 经过磁力研磨加工的工件, 其组织成分基本没有改变, 磁力研磨不会破坏叶片材料的性能, 不会产生新的缺陷。

参考文献:

[1] 帅三三, 李石磊, 玄伟东, 等. 重型燃气轮机涡轮叶片

- 材料及制造技术研究进展[J]. 热力透平, 2022, 51(3): 161-169.
- SHUAI San-san, LI Shi-lei, XUAN Wei-dong, et al. Research Progress of Materials and Key Manufacturing Technologies of Heavy-Duty Gas Turbine Blades[J]. Thermal Turbine, 2022, 51(3): 161-169.
- [2] 董志国, 王鸣, 李晓欣, 等. 航空发动机涡轮叶片材料的应用与发展[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(S2): 455-457.
- DONG Zhi-guo, WANG Ming, LI Xiao-xin, et al. Application and Progress of Materials for Turbine Blade of Aeroengine[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011, 23(S2): 455-457.
- [3] 石多奇, 王振宇, 刘长奇, 等. 典型涡扇发动机 CMCs 涡轮叶片概念设计[J/OL]. 航空动力学报, 1-14[2022-10-27].
- SHI Duo-qi, WANG Zhen-yu, LIU Chang-qi, et al. Conceptual Design of CMCs Turbine Blade for Typical Turbofan Engine[J/OL]. Journal of Aerospace Power, 1-14 [2022-10-27].
- [4] 姬芬竹, 张梦杰, 王瑞, 等. 冲压空气涡轮叶片设计和气动性能数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(7): 1387-1394.
- JI Fen-zhu, ZHANG Meng-jie, WANG Rui, et al. Blade Design and Aerodynamic Performance Numerical Simulation on Ram Air Turbine[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(7): 1387-1394.
- [5] 韩俊, 温风波, 赵广播. 小展弦比涡轮叶片的弯曲优化设计[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(1): 102-108.
- HAN Jun, WEN Feng-bo, ZHAO Guang-bo. Curve Optimization Design of a Turbine Blade Withlow Aspect Ratio [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2014, 54(1): 102-108.
- [6] MAO Yin-bo, CHEN Zi-yu, SU Xin-rong, et al. A Novel Model for CFD-Based Throughflow Analysis of Film-Cooled Turbine Blade[J]. Journal of Thermal Science, 2022, 31(5): 1759-1772.
- [7] 李虹杨, 郑赞. 粗糙度对涡轮叶片流动转捩及传热特性的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(10): 2038-2047.
- LI Hong-yang, ZHENG Yun. Effect of Surface Roughness on Flow Transition and Heat Transfer of Turbine Blade[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(10): 2038-2047.
- [8] 白涛, 王书贤. 表面粗糙度对涡轮叶片吸力面边界层的影响[J]. 西安工业大学学报, 2016, 36(8): 647-651.
- BAI Tao, WANG Shu-xian. Effect of Surface Roughness on Side Boundary Layer of Suction Surface of Turbine Blades[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2016, 36(8): 647-651.
- [9] BONS J P. A Review of Surface Roughness Effects in Gas Turbines[J]. Journal of Turbomachinery, 2010, 132(2): 1.
- [10] 邵玉芬, 胡卫兵, 温志勋, 等. 镍基单晶合金涡轮叶片榫头裂纹尖端应力场及扩展趋势[J]. 航空动力学报, 2014, 29(3): 612-618.
- GAO Yu-fen, HU Wei-bing, WEN Zhi-xun, et al. Stress Field and Propagation Trend of Crack Tip in Tenon of Nickel-Based Single Crystal Superalloys Turbine Blade [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(3): 612-618.
- [11] 郭伟, 董丽虹, 陈海生, 等. 热处理对涡轮叶片榫头表面残余应力的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(1): 175-178.
- GUO Wei, DONG Li-hong, CHEN Hai-sheng, et al. Effect of Heat Treatment on Surface Residual Stress of Turbine Blade Tenon[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(1): 175-178.
- [12] BUNKER R S. A Review of Shaped Hole Turbine Film-Cooling Technology[J]. Journal of Heat Transfer, 2005, 127(4): 441-453.
- [13] 龚森, 何安南, 马存原. 涡轮叶片前缘气膜冷却机理及流场分析[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(9): 232-239.
- GONG Miao, HE An-nan, MA Cun-yuan. Film Cooling Mechanism and Flow Field Analysis of Leading Edge of Turbine Blade[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(9): 232-239.
- [14] BUNKER R S. Gas Turbine Heat Transfer: Ten Remaining Hot Gas Path Challenges[J]. Journal of Turbomachinery, 2007, 129(2): 193-201.
- [15] KONG De-hai, ZHANG Chang-xian, MA Zhen-yuan, et al. Numerical Study on Flow and Heat Transfer Characteristics of Swirling Jet on a Dimpled Surface with Effusion Holes at Turbine Blade Leading Edge[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 209: 118243.
- [16] 李世峰, 黄康, 马护生, 等. 航空发动机涡轮叶片气膜冷却孔设计与制备技术研究进展[J]. 热能动力工程, 2022, 37(9): 1-11.
- LI Shi-feng, HUANG Kang, MA Hu-sheng, et al. Research Progress on Design and Manufacture Technologies of Film Cooling Hole for Aeroengine Turbine Blade[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(9): 1-11.
- [17] 王海涛, 张文武, 郭春海. 先进气膜孔形研究综述[J]. 航空制造技术, 2021, 64(18): 46-52, 61.
- WANG Hai-tao, ZHANG Wen-wu, GUO Chun-hai. Review on Advanced Film Cooling Hole Shapes[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(18): 46-52, 61.
- [18] 孔祥灿, 张子卿, 朱俊强, 等. 航空发动机气冷涡轮叶片冷却结构研究进展[J]. 推进技术, 2022, 43(05): 6-28.

- KONG Xiang-can, ZHANG Zi-qing, ZHU Jun-qiang, et al. Research Progress on Cooling Structure of Aeroengine Air-Cooled Turbine Blade[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(05): 6-28.
- [19] 王力, 张国伟, 郭永丰. 热障涂层高温合金气膜孔电火花加工技术研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(15): 78-83.
- WANG Li, ZHANG Guo-wei, GUO Yong-feng. Research on EDM of Cooling Holes in Thermal Barrier Coated-Superalloys[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(15): 78-83.
- [20] 王浩杰, 曹自洋, 张洋精. 航空涡轮叶片扩散型气膜孔电火花铣削加工关键工艺研究[J]. 制造技术与机床, 2022(9): 69-76.
- WANG Hao-jie, CAO Zi-yang, ZHANG Yang-jing. Research on Key Technology of EDM Milling for Diffuse Film Hole of Air Turbine Blade[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2022(9): 69-76.
- [21] 佟浩, 李勇, 李宝泉. 气膜冷却孔电加工工艺与装备技术研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(18): 34-45.
- TONG Hao, LI Yong, LI Bao-quan. Research on Technologies and Equipment of Electro Machining Film Cooling Holes[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(18): 34-45.
- [22] 潘志福, 傅军英, 张明岐. 电液束加工特性及小孔形貌控制技术研究[J]. 航空制造技术, 2020, 63(4): 14-20.
- PAN Zhi-fu, FU Jun-ying, ZHANG Ming-qi. Study on Characteristics of Electro Stream Machining and Controlling Technology of Hole Morphology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(4): 14-20.
- [23] 何雪莉, 马国庆, 肖强. 飞秒激光加工镍基高温合金叶片气膜孔的试验研究[J]. 激光与红外, 2022, 52(4): 476-482.
- HE Xue-li, MA Guo-qing, XIAO Qiang. The Experiment Research on Femtosecond Laser Machining of Film Holes on Ni-Based Superalloys Blade[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(4): 476-482.
- [24] 李杰, 瞿进锋, 杨小君, 等. 飞秒激光微加工技术在航空发动机高压单晶涡轮叶片的应用[J]. 电加工与模具, 2018(S1): 54-58.
- LI Jie, ZI Jin-feng, YANG Xiao-jun, et al. Application of Femtosecond Laser Micro-Machining Technology in Turbine Blades of Domestic Aeroengine[J]. Electromachining & Mould, 2018(S1): 54-58.
- [25] 吴博, 陈阳, 张云鹏. 高压涡轮导向叶片气膜孔皮秒激光加工试验[J]. 电加工与模具, 2022(5): 41-44.
- WU Bo, CHEN Yang, ZHANG Yun-peng. Picosecond Laser Machining of Gas Film Holes in High Pressure Turbine Guide Vanes[J]. Electromachining & Mould, 2022(5): 41-44.
- [26] 杨欢, 陈松, 马瑞, 等. 磁力研磨法去除复杂轮廓蒙皮微孔边缘毛刺[J]. 表面技术, 2021, 50(9): 342-351.
- YANG Huan, CHEN Song, MA Rui, et al. Removal of Burrs on the Edges of Micropores in Complex Contour Skins by Magnetic Finishing[J]. Surface Technology, 2021, 50(9): 342-351.
- [27] 周传强, 韩冰, 马学东, 等. SUS316 异形管件内表面磁针磁力研磨的试验研究[J]. 现代制造工程, 2019(10): 1-5.
- ZHOU Chuan-qiang, HAN Bing, MA Xue-dong, et al. Study on the Magnetic Abrasive Finishing of the Inner Surface of SUS316 Irregular Tubular by Magnetic Needles[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019(10): 1-5.
- [28] 徐会, 康仁科, 陈燕. 磁力研磨法去除燃油喷嘴积碳的试验研究[J]. 航空学报, 2020, 41(2): 623505.
- XU Hui, KANG Ren-ke, CHEN Yan. Experimental Study on Removing Carbon from Fuel Nozzles by Magnetic Grinding[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(2): 623505.
- [29] 陈燕, 胡玉刚, 巫昌海, 等. 磁针磁力研磨去除涡轮轴内壁积碳[J]. 表面技术, 2020, 49(6): 259-266.
- CHEN Yan, HU Yu-gang, WU Chang-hai, et al. Removal of Carbon Deposition on the Inner Wall of Turbo Shaft by Magnetic Needle Grinding[J]. Surface Technology, 2020, 49(6): 259-266.
- [30] 程海东, 马小刚, 韩冰, 等. 振动辅助磁针磁力研磨法对管件焊缝表面氧化皮的去除实验[J]. 表面技术, 2022, 51(8): 400-407, 459.
- CHENG Hai-dong, MA Xiao-gang, HAN Bing, et al. Removal of Oxide Scale on Weld Surface of Pipe Fittings by Vibration Assisted Magnetic Needle Magnetic Grinding[J]. Surface Technology, 2022, 51(8): 400-407, 459.

责任编辑: 万长清